

PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales Büro



INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation <sup>6</sup> :

G01B 11/24, A61C 19/04

A1

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 98/11403

(43) Internationales

Veröffentlichungsdatum:

19. März 1998 (19.03.98)

(21) Internationales Aktenzeichen:

PCT/DE97/01797

(22) Internationales Anmeldedatum: 19. August 1997 (19.08.97)

(30) Prioritätsdaten:

196 38 758.2

13. September 1996 (13.09.96) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): BENDING  
ART MEDIZINTECHNIK GMBH [DE/DE]; Rungestrasse  
19, D-10179 Berlin (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): RUBBERT, Rüdger  
[DE/DE]; Leonhardyweg 41, D-12101 Berlin (DE).

(74) Anwälte: WEBER, D. usw.; Gustav-Freytag-Strasse 25, Post-  
fach 61 45, D-65051 Wiesbaden (DE).

(81) Bestimmungsstaaten: AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,  
BR, BY, CA, CN, CU, CZ, DK, EE, ES, FI, GB, GE, GH,  
HU, IL, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS,  
LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL,  
PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT,  
UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZW, ARIPO Patent (GH, KE,  
LS, MW, SD, SZ, UG, ZW), curasisches Patent (AM, AZ,  
BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT,  
BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,  
NL, PT, SE), OAPI Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,  
GN, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

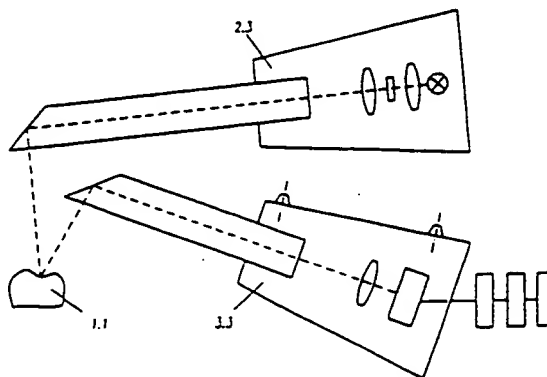
Veröffentlicht

Mit internationalem Recherchenbericht.

Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen  
Frist. Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen  
eintreffen.

(54) Title: THREE-DIMENSIONAL OBJECT MEASUREMENT PROCESS AND DEVICE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR DREIDIMENSIONALEN VERMESSUNG VON OBJEKTEN



(57) Abstract

A three-dimensional object measurement process and device are disclosed by means of optical image capture, projection of patterns and triangulation calculations. The pattern projection unit and the image capture unit are separately designed and can be independently positioned and guided during the measurement process. This is particularly advantageous for diagnosis, therapy and documentation in the field of invasive medicine.

(57) Zusammenfassung

Beschrieben wird ein Verfahren und eine Vorrichtung zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten durch optische Aufnahmen, aufprojizierte Muster und Triangulationsberechnungen, bei dem die Projektionseinheit für das Muster und die Aufnahmeeinheit voneinander getrennt aufgebaut sind und im Verlauf des Vermessungsvorgangs unabhängig voneinander positioniert bzw. geführt werden können. Dies ist insbesondere für Diagnostik, Therapie und Dokumentation im invasivmedizinischen Bereich vorteilhaft.

### **Verfahren und Vorrichtung zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten durch optische Aufnahmen, aufprojizierte Muster und Triangulationsberechnungen, bei dem die Einrichtungen für die Projektion des Musters und für die Bildaufnahme  
5 voneinander getrennt aufgebaut sind und für die Vermessung unabhängig voneinander positioniert werden können.

Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung für ein solches Verfahren.

10

Zum Zweck der Vermessung bietet der Einsatz von Verfahren, die auf optischer Grundlage arbeiten, eine Vielzahl von Vorteilen. Eine Vermessung kann schnell und berührungslos erfolgen. Zum Stand der Technik gehören elektronische Bildwandler,

beispielsweise CCD-Arrays, deren Ausgangssignale unmittelbar nach einer Digitalisierung gespeichert oder ausgewertet werden können.

5 Bekannt sind Verfahren und Vorrichtungen zur Darstellung und optischen dreidimensionalen Vermessung von räumlichen Oberflächen. Sie basieren auf Triangulationsverfahren, bei denen unter einem bestimmten Winkel Punkt-, Linien- oder beliebige andere Muster auf die betrachtete Oberfläche projiziert werden und die projizierten Muster unter einem anderen Blickwinkel mit einer Optik und einem Bildwandler aufgenommen werden. Die bekannte Geometrie zwischen  
10 Projektionsrichtung und Aufnahmerichtung erlaubt die dreidimensionale Berechnung von Stützpunkten der Oberfläche.

Projiziert man auf ein Objekt mit räumlichen Erstreckungen beispielsweise ein gleichmäßiges Linienmuster, ergibt sich bei einer von der Projektionsrichtung  
15 verschiedenen Blickrichtung aufgrund der Oberflächengestalt des Objekts ein verzerrtes Linienmuster. Bildet man aus dieser Betrachtungsrichtung das Objekt durch eine geeignete Optik auf ein CCD-Array ab, digitalisiert man die Bildsignale und stellt sie einer Datenverarbeitungseinheit zur Verfügung, ist es möglich, an verschiedenen Stellen des Bildes die Linien zu identifizieren und bei Kenntnis des  
20 optischen Strahlengangs und unter Berücksichtigung der geometrischen Ausbildung des projizierten Linienmusters über Triangulation 3D-Koordinaten zu errechnen.

Es gehört zum Stand der Technik, bei der Aufnahme mehrerer Einzelbilder mit unterschiedlicher Aufnahmerichtung, die gewonnenen Teilinformationen über  
25 dreidimensionale Oberflächen anhand der 3D-Koordinaten übereinstimmender Oberflächensegmente mittels sogenannter "Matching-Algorithmen" zu einer Gesamtinformation zu kombinieren.

30 Nun ist es beispielsweise für endoskopische Untersuchungen wünschenswert

- a) getrennte Einheiten für die Projektion des Musters und für die Bildaufnahme zu verwenden und diese mit einer frei wählbaren Ausrichtung gegenüber der zu vermessenenden Oberfläche einzusetzen. Um für die Triangulationsberechnung

- 3 -

relevante Daten zu erhalten darf hierbei ein minimaler Winkel zwischen der Ausrichtung der beiden Einheiten nicht unterschritten werden;

- 5        b)    sofern eine Folge von Einzelbildern aufgenommen wird, während des Aufnahmevorgangs die Position und Ausrichtung der beiden Einheiten gegenüber dem Objekt, zur Vereinfachung der Handhabung, unabhängig voneinander zu verändern, beispielsweise um weitere Oberflächenbereiche durch zusätzlichen Bildaufnahmen vermessen zu können.

10

Aufgabe der Erfindung ist es daher, das Verfahren und die Vorrichtung zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten der eingangs beschriebenen Art zu schaffen, bei dem die Position und Orientierung der Aufnahmeeinheit und der Projektionseinheit zueinander bestimmt werden kann und für den Fall, daß mehr als  
15        eine Aufnahme zweckdienlich ist, die im Verlauf des Aufnahmevorgangs erfolgte unabhängige Bewegung der beiden Einheiten zueinander zuverfolgen. Für die Triangulationsberechnung muß dann der für das jeweilige Einzelbild ermittelte geometrische Zusammenhang zwischen Bildaufnahme und Musterprojektion berücksichtigt werden.

20

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß bei dem Verfahren dadurch gelöst, daß unter Verwendung

- 25        a)    eines flächigen elektronischen Bildwandlers ein Aufnahmevorgang durchgeführt wird;
- b)    einer Strahlquelle und geeigneten optischen Mitteln ein Muster unter einem von der Aufnahmerichtung verschiedenen Winkel auf das zu vermessende Objekt projiziert wird;
- 30        c)    einer geeigneten Einheit die Ausgangssignale des Bildwandlers digitalisiert werden und diese Daten einer Datenverarbeitungsanlage zur Verfügung gestellt werden;

d) einer Datenverarbeitungsanlage mittels geeigneter Schaltungen und/oder Algorithmen aus den Bilddaten der Einzelbilder über Triangulationsberechnungen 3D-Koordinaten von Punkten der Oberfläche des zu vermessenden Objekts bestimmt werden;

5

weitere Einrichtungen derart vorgesehen und/oder die zum Einsatz kommenden Verfahren und/oder Einrichtungen derart ausgebildet werden, daß die Position und Ausrichtung der Aufnahmeeinheit und der Projektionseinheit zueinander bestimmt werden kann. Ist die Position und Ausrichtung beider Einheiten für die Aufnahme eines Einzelbildes zueinander bekannt, können in der bekannten Art und Weise für eine Anzahl von Punkten der Oberfläche über Triangulationsberechnung 3D-Koordinaten ermittelt werden.

10

Es ist erfindungsgemäß vorteilhaft zu diesem Zweck zusätzliche Einrichtungen zu verwenden, um die Position und Ausrichtung der Aufnahmeeinheit und der Projektionseinheit zueinander zu messen.

15

Dies kann erfindungsgemäß vorteilhaft sowohl direkt als auch indirekt, sowohl tastend oder mit den Meßmitteln verbunden als auch berührungslos, beispielsweise auf optischem Weg erfolgen.

20

Sollen nun zusätzliche Informationen als zu den aus einer Einzelaufnahme akquirierten Informationen über das Objekt erfaßt werden, muß die Aufnahmeeinheit in der Lage sein eine Folge von Einzelbildern aufzunehmen. Für die erfindungsgemäße Aufgabe, daß die Projektionseinheit und die Aufnahmeeinheit im Verlauf des Aufnahmevorgangs unterschiedlich bewegt werden, müssen die Einrichtungen und/oder Verfahren erfindungsgemäß vorteilhaft derart ausgebildet sein, daß auch für die Folgebilder die geometrische Anordnung der Aufnahmeeinheit und der Projektionseinheit zueinander bestimmt werden kann.

25

30

Dies kann erfindungsgemäß vorteilhaft dadurch gewährleistet werden, daß die oben genannten Meßmittel auch zum Zeitpunkt der zusätzlich durchgeführten Aufnahmen ausgewertet und die Meßergebnisse in der beschriebenen Art und Weise in der Triangulationsberechnung berücksichtigt werden.

5 Für den Fall, daß in der Folge der Einzelbilder das Objekt derart aufgenommen wird, daß die aus dem Einzelbild ermittelten 3D-Koordinaten zu einem nennenswerten Anteil übereinstimmende Oberflächensegmente beschreiben, können - wie oben beschrieben - die jeweiligen 3D-Informationen durch zum Stand der Technik gehörende "Matching-Algorithmen" kombiniert werden.

10 Erfolgt die Aufnahme der Einzelbilder in schneller Folge, kann bei entsprechender Handhabung der Einheiten davon ausgegangen werden, daß - erstens - der Anteil übereinstimmender Oberflächensegmente ausreichend ist und - zweitens - die geometrische Zuordnung der Aufnahmeeinheit und der Projektionseinheit zueinander nur in Maßen gegenüber der vorherigen Aufnahme verändert wurde.

15 War also die Zuordnung beider Einheiten bei beispielsweise der ersten Aufnahme bekannt und konnte eine nennenswerte Anzahl von die Oberfläche beschreibenden 3D-Koordinaten berechnet werden, dann unterscheiden sich die in der nächsten Aufnahme enthaltenen Informationen in folgenden Komponenten:

- 20 a) die 3D-Koordinaten der übereinstimmenden Oberflächensegmente können linear in den drei Raumrichtungen versetzt abgebildet sein;
- b) die 3D-Koordinaten der übereinstimmenden Oberflächensegmente können bezogen auf die drei Raumrichtungen rotativ versetzt abgebildet sein;
- 25 c) die relative Position der Aufnahmeeinheit und der Projektionseinheit zueinander kann linear in den drei Raumrichtungen zueinander verändert worden sein;
- d) die relative Position der Aufnahmeeinheit und der Projektionseinheit zueinander kann bezogen auf die drei Raumrichtungen rotativ verändert worden sein;

30

Diese Veränderungsmöglichkeiten werden im folgenden zum Zwecke der Verallgemeinerung der Aussagen auch als "Freiheitsgrade" bezeichnet.

- Zum Stand der Technik in dem Fachgebiet der grafischen Datenverarbeitung gehören Matching-Algorithmen, die aus unterschiedlichen Datensätzen von 3D-Koordinaten die Schnittmenge derjenigen Daten bilden, die übereinstimmenden Oberflächensegmenten zuzuordnen sind, und die die vorstehend gelisteten möglichen
- 5 Veränderungen a) und b) variieren und derart optimieren, daß die Schnittmenge der jeweiligen 3D-Daten beider Datensätze unter Berücksichtigung der entsprechenden Verschiebungen und Drehungen optimal ineinander passen. Voraussetzung hierfür ist, daß die vorstehend gelisteten Veränderungen c) und d) bekannt sind.
- 10 Aus der numerischen Mathematik sind Algorithmen bekannt, die eine endliche Anzahl von Freiheitsgraden systematisch variieren und unter Berücksichtigung eines oder mehrerer Gütekriterien optimieren. Bei einer systematischen Variation potenziert sich jedoch der Rechenaufwand mit jedem zusätzlichen Freiheitsgrad.
- 15 Aus der Bionik sind im Zusammenhang mit dem Stichwort "Evolutionsstrategien" rekursiv gestufte Verfahren bekannt, die durch stochastische Variation der Freiheitsgrade und stufenweiser Auswahl der jeweils besten Variante unter der Voraussetzung, daß die auszuwertenden Informationsmengen im wesentlichen
- 20 ähnlich sind, erstaunlich schnell einer optimalen Lösung zustreben.
- Es ist in diesem Sinne erfindungsgemäß vorteilhaft zur Lösung der erfindungsgemäßen Aufgabe erweiterte Matching-Algorithmen derart zu verwenden, daß
- 25 - erstens - in einem rekursiven numerischen Prozeß zunächst mehrfach sogenannte "Nachkommen"-Varianten durch stochastische Variation der vorstehend genannten Freiheitsgrade c) und d) gebildet werden,
- 30 - zweitens - für jede Nachkommen-Variante der 3D-Datensatz unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen für die Freiheitsgrade c) und d) aus den Bildinformationen durch Triangulation in bekannter Weise berechnet werden,

- 7 -

5 - drittens - für jede Nachkommen-Variante in einer Matching-Berechnung in bekannter Art und Weise aus den unterschiedlichen Datensätzen von 3D-Koordinaten die Schnittmenge derjenigen Daten gebildet werden, die übereinstimmenden Oberflächensegmenten zuzuordnen sind, und die vorstehend gelisteten Freiheitsgrade a) und b) derart variiert und optimiert werden, daß die gebildete Schnittmenge der jeweiligen 3D-Daten beider Datensätze sich optimal unter Berücksichtigung der jeweils gewählten geometrischen Veränderung bezüglich der Freiheitsgrade a) und b) ineinander transformieren läßt,

10

- viertens - aus den Nachkommen-Varianten im Sinne einer Evolution diejenige ausgewählt wird, die die maximal erreichte Güte hinsichtlich der Übereinstimmung der dasselbe Oberflächensegment beschreibenden Daten aus beiden Datensätzen aufweist,

15

- fünftens - entsprechend der beschriebenen Evolutionsstrategie ausgehend von den getroffenen Annahmen für die Freiheitsgrade c) und d) der zuvor ausgewählten besten Nachkommen-Variante mit reduzierten Grenzen die Freiheitsgrade c) und d) wieder in verschiedenen Varianten neue Nachkommen der nächsten Generation erneut stochastisch variiert werden und entsprechend den o. g. fünf Punkten - erstens bis fünftens - solange rekursiv verfahren wird, bis die Variationsgrenzen der Freiheitsgrade c) und d) und die Unterschiede zwischen den Generationen bzgl. der in jedem Durchlauf erreichten maximalen Güte hinreichend klein werden.

20

25

Im Ergebnis sind alle benötigten Informationen mit ausreichender Genauigkeit bekannt.

30 Es ist erfindungsgemäß vorteilhaft, die Einrichtungen für die Projektion des Musters und für die Bildaufnahme derart auszubilden, daß diese während der Aufnahme des ersten Einzelbildes starr und in eindeutiger Position und Orientierung miteinander verbunden sind. Im weiteren Verlauf der Aufnahme wird die Verbindung gelöst und damit eine voneinander unabhängige Bewegung ermöglicht. Die zusätzlichen dreidimensionalen Vermessungswerte des Objekts können dann für jede neue



Bildaufnahme mit dem vorstehend beschriebenen erweiterten Matching-Algorithmus berechnet werden und wie oben beschrieben zu einer Gesamtinformation kombiniert werden.

- 5 Es ist alternativ erfindungsgemäß vorteilhaft, die geometrische Anordnung der Projektionseinheit und der Aufnahmeeinheit zueinander dadurch zu messen, daß das verwendete Muster sowohl auf das Objekt als auch auf die Bildaufnahmeeinheit projiziert wird und das sich auf einer definierten starr mit der Bildaufnahmeeinheit verbundenen Oberfläche ergebende Muster durch einen Bereich des Bildwandlers  
10 aufgenommen wird. In diesem Sinne kann der Bildwandler mit einem Teil seines flächigen Sichtfelds das Objekt und mit dem anderen Teil das auf die Bildaufnahmeeinheit selbst projizierte Muster aufnehmen.

- Bei der Auswertung der Bildinformation wird dann erfindungsgemäß vorteilhaft  
15 zunächst aus der Verzerrung des auf die beispielsweise ebene und als Mattscheibe ausgebildete Oberfläche der Bildaufnahmeeinheit projizierten Musters die geometrische Anordnung der beiden Einheiten zueinander über Triangulation errechnet und im weiteren unter Berücksichtigung der Zuordnung der beiden Einheiten zueinander in oben beschriebener Art und Weise das Objekt räumlich  
20 vermessen.

- Aus der deutschen Patentanmeldung "Verfahren zur Erhöhung der Signifikanz der dreidimensionalen Vermessung von Objekten" vom 12. 9. 1996 desselben Anmelders  
25 ist ein Verfahren bekannt, bei dem kodierte Muster auf das Objekt zur Vermeidung von Mannigfaltigkeiten bei Triangulationsberechnungen projiziert werden.

- Es ist erfindungsgemäß besonders vorteilhaft derart kodierte Muster für die Bestimmung der Zuordnung der Projektionseinheit und der Aufnahmeeinheit zueinander zu verwenden.  
30

Aus der deutschen Patentanmeldung 196 36 354.3 desselben Anmelders ist ein Verfahren und eine Vorrichtung bekannt, bei dem durch synchron zur Bildwechselfrequenz des Bildwandlers gestellte optische Mittel Strahlengänge abwechselnd wirksam oder unwirksam geschaltet werden können.

- 5 Es ist erfindungsgemäß besonders vorteilhaft, die Blickrichtung der Aufnahmeeinheit in diesem Sinne beispielsweise durch zwei flächig wirksame LCD-Einheiten - die beispielsweise an zwei optischen Achsen eines Strahlteilers angeordnet werden - synchron zur Bildwechselfrequenz des Bildwandlers abwechselnd optisch durchlässig und undurchlässig zu schalten. Dies hat den Vorteil, daß zum Zwecke der Bestimmung der geometrischen Zuordnung der Projektions- zur Aufnahmeeinheit das Sichtfeld des Bildwandlers und damit die Auflösung bei der Abbildung des Objekts nicht reduziert werden muß.
- 10 Es ist erfindungsgemäß vorteilhaft zusätzlich weitere optische Mittel zur Projektion eines beispielsweise unterschiedlichen Musters auf die Bildaufnahmeeinheit auf der Projektionseinheit anzuordnen.
- 15 Es kann alternativ zu der oben beschriebenen starr mit der Aufnahmeeinheit gekoppelten Oberfläche erfindungsgemäß vorteilhaft das Muster auf eine getrennt angeordnete Oberfläche mit bekannter räumlicher Erstreckung zum Zwecke der Bestimmung der Zuordnung der Aufnahme- und Projektionseinheit zueinander projiziert und auf dem Bildwandler der Aufnahmeeinheit abgebildet werden.
- 20 Es kann erfindungsgemäß vorteilhaft eine zweite Aufnahmeeinheit zum Zwecke der Bestimmung der Zuordnung der Aufnahme- und Projektionseinheit zueinander angeordnet werden.
- 25 Sämtliche in dieser Erfindung beschriebenen Ausgestaltungen des Verfahrens und der Vorrichtung können erfindungsgemäß besonders vorteilhaft in vielfältiger Art und Weise miteinander kombiniert werden.
- 30 Die Vorrichtung zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten der eingangs beschriebenen Art löst die Aufgabe gemäß der Erfindung durch die Merkmale, daß
- a) mindestens ein flächiger elektronischer Bildwandler unter Verwendung einer zur Aufnahme von Bildern geeigneten Optik verwendet wird;

- 10 -

- b) mindestens eine Einrichtung verwendet wird, die die Digitalisierung der Ausgangssignale des mindestens einen Bildwandlers bewirkt und diese Daten einer Datenverarbeitungsanlage zur Verfügung stellt;
- 5 c) mindestens eine Einrichtung verwendet wird, die die Projektion eines Musters erlaubt;
- d) die Einrichtungen zur Projektion des Musters und zur Bildaufnahme unabhängig voneinander aufgebaut sind;
- 10 e) mindestens eine Datenverarbeitungsanlage unter Verwendung geeigneter Schaltungen und/oder Algorithmen sich für die Berechnung von 3D-Koordinaten nach dem Triangulationsverfahren eignet und
- 15 f) sich mindestens eine Einrichtung für die Bestimmung der geometrischen Zuordnung zwischen der Projektionseinheit und der Aufnahmeeinheit eignet.

Bei einer erfindungsgemäß besonders vorteilhaften Ausbildung der Vorrichtung eignet sich die Bildaufnahmeeinheit für die Aufnahme von mindestens zwei aufeinanderfolgenden Bildern.

20

Eine erfindungsgemäß besonders vorteilhafte Ausbildung der Vorrichtung sieht Einrichtungen vor, die die Daten von mindestens zwei Einzelbildern speichern können.

25

Eine erfindungsgemäß besonders vorteilhafte Ausbildung der Vorrichtung sieht Einrichtungen vor, die die Daten von mindestens zwei Einzelbildern verarbeiten und in der Lage sind, diese mittels geeigneter Schaltungen und/oder Algorithmen zu kombinieren.

30

Weitere Vorteile, Merkmale und Anwendungsmöglichkeiten der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der folgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele in Verbindung mit den anliegenden Zeichnungen Fig. 1, 2, 3 und 4. Es zeigen:

5

Fig. 1 schematisch eine Ausführungsform der Aufnahmeeinrichtung mit voneinander getrennter Projektions- und Aufnahmeeinheit, welche hier zum Zwecke der Aufnahme eines ersten Bildes unter definierten geometrischen Bedingungen bzgl. Projektions- und Aufnahmerichtung mit Hilfe von Positionierstiften zusammengekoppelt sind.

10

Fig. 2 die gleiche Vorrichtung wie Fig. 1, jedoch entkoppelt zur Durchführung weiterer Aufnahmen.

15

Fig. 3 schematisch eine weitere Ausführungsform der Aufnahmeeinrichtung mit voneinander getrennter Projektions- und Aufnahmeeinheit, gekennzeichnet durch die zusätzliche Projektion desselben Musters über einen zweiten Strahlengang der Projektionseinheit direkt auf eine Mattscheibe der Aufnahmeeinheit, dies zum Zwecke der ständigen Berechnung ihrer geometrischen Situation zueinander.

20

Fig. 4 beispielhaft eine Ausführungsform eines kodierten Musters.

25

Die Projektions- und Aufnahmeeinheiten in den Ausführungsformen gemäß Fig. 1, 2 und 3 sind zur Vereinfachung der Beschreibung ohne bekannte, selbstverständliche Vorrichtungsteile nur schematisch wiedergegeben. Zur Vereinfachung der Beschreibung wurde zudem darauf verzichtet, Ausführungsformen von Vorrichtungsteilen, die zum Stand der Technik gehören, wie bestimmte Ausführungsformen von Verbindungen oder der Fixierung von Teilen, im Detail zu beschreiben.

30

In der Ausführungsform der Fig. 1 sind mit dem Grundgestell (2.3) der Projektionseinheit starr verbunden: Die Strahlquelle (2.7), die optischen Mittel (2.4 und 2.6) und der Musterträger (2.5). In der hier gezeigten Ausführungsform handelt es sich bei den optischen Mitteln um eine Strahlquelle (2.7), mit welcher sich das Objekt flächig beleuchten läßt, einen Kondensor (2.6) sowie einen Musterträger, auf welchem sich das Muster (eingesätzt oder in Form eines Dias) befindet. Der Träger (2.2) ist aus hygienischen Gründen (zum Zwecke der Desinfektion) lösbar mit dem Grundgestell (2.3) verbunden. Die Verbindung des Trägers (2.2) mit dem Grundgestell (2.3) ist derart ausgebildet, daß nach einem Wechsel des Trägers (2.2) sich dessen vorgesehene geometrische Position exakt (ohne Justage) wieder ergibt. Das auf dem Musterträger (2.5) befindliche Muster wird mittels einer Strahlumlenkung (2.1) auf das aufzunehmende Objekt (1.1) projiziert. Um für die 3D-Berechnung relevante Informationen zu bekommen, ist ein projiziertes Linienmuster quer zu der von dem Triangulationswinkel aufgespannten Ebene gestreift.

Mit dem Grundgestell (3.3) der Aufnahmeeinheit sind starr verbunden: Das optische Mittel (3.4), der elektronische Bildwandler (3.5) sowie die Positionierstifte (3.10). Der Träger (3.2) ist aus hygienischen Gründen (zum Zwecke der Desinfektion) lösbar mit dem Grundgestell (3.3) verbunden. Die Verbindung des Trägers (3.2) mit dem Grundgestell (3.3) ist derart ausgebildet, daß nach einem Wechsel des Trägers (3.2) sich dessen vorgesehene geometrische Position exakt (ohne Justage) wieder ergibt. Der elektronische Bildwandler (3.5) ist als CCD-Array ausgebildet und über die elektrischen Verbindungen (3.9) mit der Ansteuerheit (3.6), dem A/D-Wandler (3.7) und der Datenverarbeitungseinheit (3.8) verbunden. Die vom Objekt (1.1) reflektierten Strahlen werden mittels des optischen Mittels (3.4), in diesem Fall eines Objektives auf dem Bildwandler (3.5) abgebildet.

Zur Durchführung der ersten Aufnahme werden Projektions- und Aufnahmeeinheit mithilfe zweier Positionierstifte (3.10) in eine definierte Position zueinander gebracht. Der somit bekannte Triangulationswinkel erlaubt die Berechnung der 3D-Koordinaten des aufgenommenen Bildes.

- Die Fig. 2 zeigt die gleiche Projektions- und Aufnahmeeinheit, jedoch in entkoppeltem Zustand nach Durchführung der ersten Aufnahme einer Bildfolge von Aufnahmen desselben Objekts. Es können nun weitere Bilder von zusätzlichen Bereichen des Objekts und/oder aus veränderter Blickrichtung aufgenommen werden. Infolge der hohen Aufnahmefrequenz, beispielsweise in der gezeigten Ausgestaltung von 50 Hz, kann von einer hohen, in jedem Fall ausreichenden Überlappung der Bilder ausgegangen werden, welche es erlaubt, mittels geeigneter Matching-Algorithmen und numerischer Verfahren die sich gegenüber der jeweils vorhergehenden Aufnahme verändernde relative Position von Projektions- und Aufnahmeeinheit zueinander als auch zum Objekt und damit auch beispielsweise den jeweilig relevanten Triangulationswinkel zu berechnen. Dies ermöglicht die Erfassung von 3D-Koordinaten eines Objektes, welche mit einer Einzelaufnahme nicht hätten erfaßt werden können.
- Die Fig. 3 zeigt eine Ausführungsform, bei welcher vermittels der Projektion desselben Musters über einen zweiten - außerhalb der (invasiv) in Anwendung kommenden Vorrichtungsteile - geführten Strahlengang von der Projektionseinheit zur Aufnahmeeinheit die relative Position von Projektions- und Aufnahmeeinheit zueinander zum Zeitpunkt jeder Aufnahme bekannt ist. Bei dieser Ausführungsform wird das Muster über einen Strahlteiler (2.8) um 90° Grad umgelenkt und durch eine an der Projektionseinheit befindliche Linse (2.9) mit divergentem Strahlengang auf eine auf der Aufnahmeeinheit angeordnete Mattscheibe (3.12) projiziert. Das sich hierdurch ergebende Abbild eines Teils des Musters wird über eine Strahlumlenkung (3.11) um 90° Grad derart in den Strahlengang des Trägers der Aufnahmeeinheit gelenkt, daß es auf einer Hälfte des flächigen Sichtfeldes des elektronischen Bildwandlers (3.5) abgebildet wird. Durch Auswertung der signifikanten Mustersegmente des Abbildes vermittels geeigneter numerischer Verfahren in der Datenverarbeitungseinheit (3.8) ist die relative Lage von Projektions- zu Aufnahmeeinheit-für jede einzelne Aufnahme bekannt. Die erreichbare Genauigkeit der 3D-Koordinaten kann mit dieser Ausführungsform gegenüber der vorstehend beschrieben insbesondere bei komplexen Objekten, deren 3D-Koordinaten sich nur durch die Auswertung einer Vielzahl von Aufnahmen berechnen lassen signifikant gesteigert werden.

Die Fig. 4 zeigt beispielhaft eine Ausführungsform des Musters, durch welche aufgrund der unterschiedlichen Ausführung eines jeden einzelnen konzentrischen Elements (Kodierung) Mannigfaltigkeiten bei der Triangulationsberechnung vermieden werden können.

5

Eine besonders vorteilhafte Anwendung der Erfindung ist im invasiv-medizinischen Bereich zu sehen. Für die optische dreidimensionale Erfassung beispielsweise eines Organs im menschlichen Körper führt man den vorderen Teil des Trägers (2.3) sowie des Trägers (3.2) beispielsweise durch die Bauchdecke ein, startet den Aufnahmevorgang durch ein in den Abbildungen nicht gezeigtes, im Rahmen der Datenverarbeitungseinheit (3.8) verfügbares Betätigungselement und bewegt im Verlauf des Aufnahmevorgangs die Projektions- und Aufnahmeeinheit derart, daß nach und nach alle relevanten Oberflächenbereiche des Objekts (1.1) sowohl auf dem Bildwandler (3.5) abgebildet als auch gleichermaßen von der Projektion des Linienmusters erfaßt werden. Man beendet den Aufnahmevorgang durch eine weitere Betätigung des vorstehend genannten Betätigungselements.

In der Folge der aufgenommenen Einzelbildinformationen befinden sich jetzt die Abbilder des aufgrund der Oberflächengestalt des Objekts (1.1) verzeichneten Linienmusters. Aus der Verzeichnung des Linienmusters lassen sich bei Kenntnis des optischen Strahlengangs und unter Berücksichtigung der geometrischen Ausbildung des projizierten Linienmusters für die entsprechenden Einzelaufnahmen für eine Vielzahl von Stützpunkten 3D-Koordinaten errechnen. Aus der Folge der den Einzelbildern zugeordneten 3D-Koordinaten lassen sich im weiteren die 3D-Koordinaten in der oben beschriebenen Art und Weise kombinieren, so daß im Ergebnis trotz der Begrenzungen der Projektionsfläche und des Sichtfelds der Aufnahmeeinheit die 3D-Koordinaten der gesamten untersuchten Oberfläche vorliegen. Hierbei sind Informationslücken aufgrund von Hinterschneidungen nicht mehr vorhanden. Durch eine online-Berechnung und -Anzeige der jeweiligen Zwischenergebnisse kann der Bediener zudem die Führung der Aufnahmevorrichtung von Hand optimieren.

Die hier gezeigten Ausführungsformen zeichnen sich u. a. dadurch aus, daß

- a) in der Projektions- und Aufnahmeeinheit keine bewegten Teile Verwendung finden;
- b) der optische Aufbau einfach ausgebildet ist;
- d) sich außer für die Träger (2.2 und 3.2), die Grundgestelle (2.3 und 3.3) und den Musterträger zur Projektion des Musters (2.5) handelsübliche Hardware-Komponenten verwenden lassen;

Aus der deutschen Patentanmeldung 196 36 354.3 desselben Anmelders ist ein Verfahren und eine Vorrichtung bekannt, bei dem durch synchron zur Bildwechselfrequenz des Bildwandlers optische Mittel derart gestellt werden, daß abwechselnd ein Muster auf die zu vermessende Oberfläche projiziert und die betrachtete Oberfläche vollständig ausgeleuchtet wird.

Bei einer erfindungsgemäß besonders vorteilhaften Ausbildung der Aufnahmeeinrichtung werden in dem vorstehenden Sinne zusätzliche Mittel derart angeordnet und gestellt, daß aus einer Folge von Einzelbildern sowohl 3D-Informationen als auch beispielsweise farbige Ansichten der erfaßten Oberfläche gewonnen werden können.



**Bezugszeichenliste**

- 1.1            Objekt mit dreidimensionaler Erstreckung
- 2.            Projektionseinheit
  - 2.1            Strahlumlenkung (Spiegel)
  - 2.2            Träger (hier ausgeführt als Körper aus optischem Glas)
  - 2.3            Grundgestell
  - 2.4            Optische Mittel (Objektiv)
  - 2.5            Musterträger (mit eingeätztem Muster oder z. B. Dia)
  - 2.6            Optische Mittel (Kondensor)
  - 2.7            Strahlquelle
  - 2.8            Strahlteiler
  - 2.9            Optische Mittel (Linse)
- 3.            Aufnahmeeinheit
  - 3.1            Strahlumlenkung (Spiegel)
  - 3.2            Träger (hier ausgeführt als Körper aus optischem Glas)
  - 3.3            Grundgestell
  - 3.4            Optische Mittel (Objektiv)
  - 3.5            Elektronischer Bildwandler (CCD-Array)
  - 3.6            Ansteuereinheit
  - 3.7            A/D-Wandler (Frame-Grabber)
  - 3.8            Datenverarbeitungseinheit
  - 3.9            Elektrische Verbindungen
  - 3.10           Positionierstifte
  - 3.11           Strahlumlenkung (Umlenkprisma)
  - 3.12           Mattscheibe

### Patentansprüche

1. Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten (1.1) durch optische Aufnahmen, aufprojizierte Muster und Triangulationsberechnungen, unter Verwendung mindestens eines elektronischen Bildwandlers (3.5) mit flächigem Sichtfeld, mindestens eines optischen Mittels (3.4) für die Abbildung des Objektes auf dem Bildwandler (3.5) und mindestens einer Strahlquelle (2.7) und geeigneter optischer Mittel (2.4, 2.5 und 2.6) für die Projektion von Mustern, dadurch gekennzeichnet, daß
- a) die Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters von den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme räumlich getrennt, nicht mit ihnen verbunden und ihnen gegenüber in allen Freiheitsgraden beweglich sind.
- b) für mindestens eine Bildaufnahme im Verlauf des Aufnahmevorgangs die geometrische Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme nicht von vornherein bekannt ist und unter Verwendung weiterer Mittel bestimmt werden muß.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei den weiteren Mitteln, die zur Bestimmung der geometrischen Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme verwendet werden, um Mittel zur Vermessung dieser geometrischen Anordnung handelt.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Vermessung der geometrischen Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme auf optischem Wege erfolgt.

- 5      4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß für die optische Vermessung der geometrischen Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme Triangulationsberechnungen unter Verwendung markanter Muster zum Einsatz kommen.
- 10      5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die markanten Muster für die optische Vermessung der geometrischen Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme durch Projektion gebildet werden.
- 15      6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß im Strahlengang der Projektion des Musters für die Vermessung des Objekts (1.1) ein Strahlteiler (2.8) angeordnet ist, sodaß das auf dem Musterträger (2.5) aufgebrachte Muster gleichermaßen zur Vermessung des Objekts verwendet wird und auf einer starr mit dem Grundgestell (3.3) verbundenen und in ihrer räumlichen Erstreckung bekannten Oberfläche (3.12) abgebildet wird.
- 20      7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß durch optische Mittel (3.11) das auf die Oberfläche (3.12) projizierte Muster auf dem Bildwandler (3.5) abgebildet wird.
- 25      8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei der Oberfläche (3.12) um eine Mattscheibe handelt.
- 30      9. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei den optischen Mitteln (3.11) um einen Spiegel handelt,

10. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß

- a) es sich bei den optischen Mitteln (3.11) um einen Strahlteiler handelt, der den gesamten Strahlengang abdeckt,
- b) mindestens zwei Einzelaufnahmen im Verlauf des Aufnahmevorgangs angefertigt werden und
- c) zusätzlich schaltbare optische Mittel an zwei optischen Achsen des Strahlteilers angeordnet werden, die synchron zur Bildwechselfrequenz des Bildwandlers abwechselnd optisch durchlässig und undurchlässig geschaltet werden.

11. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß

- a) mindestens zwei Einzelaufnahmen im Verlauf des Aufnahmevorgangs angefertigt werden,
- b) die geometrische Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme für die Aufnahme eines Einzelbildes bekannt ist,
- c) für wesentliche Bereiche des Objekts, für die bereits in dieser Bildaufnahme - die mit bekannter geometrischer Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme durchgeführt wurde -, eine ausreichende Anzahl von 3D-Koordinaten von Oberflächenbereichen gebildet werden konnte, für die auch in den nachfolgenden Einzelbildern entsprechende Bildinformationen vorliegen und
- c) die geometrische Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme aus dem Vergleich der aus den Einzelbildern stammenden Daten bezüglich der Informationen hinsichtlich gleichermaßen abgebildeter

Oberflächenbereiche des Objekts unter Verwendung numerischer Algorithmen berechnet wird.

- 5 12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die geometrische Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme für die Aufnahme eines Einzelbildes dadurch bekannt ist, daß die Positionierstifte (3.10) abgesteckt wurden.
- 10 13. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei den verwendeten numerischen Algorithmen, die die geometrische Anordnung der Mittel (2.1 bis 2.7) für die Projektion des Musters gegenüber den Mitteln (3.1 bis 3.5) für die Bildaufnahme berechnen, um Verfahren nach einer optimierenden Evolutionsstrategie handelt.
- 15 14. Verwendung der Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13 für die medizinische Diagnostik, Therapie oder Dokumentation.
- 20 15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens ein Bildwandler (3.5) als CCD-Array ausgebildet ist.
- 25 16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Grundgestell (2.3) oder der Träger (2.2) mindestens zwei der Mittel (2.4 bis 2.7) starr verbindet.
- 30 17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15 und 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Grundgestell (3.3) oder der Träger (3.2) die Mittel (3.4 und 3.5) starr verbindet.
18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger (2.2) mit seinen Aufbauten mit dem Grundgestell (2.3) lösbar verbunden und im übrigen derart ausgebildet ist, daß er sich für eine separate Sterilisation bzw. Desinfektion eignet.

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger (3.2) mit seinen Aufbauten mit dem Grundgestell (3.3) lösbar verbunden und im übrigen derart ausgebildet ist, daß er sich für eine separate Sterilisation bzw. Desinfektion eignet.
- 5
20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß an dem Träger (3.2) mindestens ein Linsensystem zur optischen Abbildung des Objekts (1.1) auf dem Bildwandler (3.5) befestigt ist.
- 10
21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß an dem Träger (2.2) mindestens ein Linsensystem zur optischen Projektion des Musters auf das Objekt (1.1) befestigt ist.
- 15
22. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger (2.2) mindestens über eine optische Umlenkeinrichtung (2.1) verfügt.
- 20
23. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13 sowie 15 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger (3.2) mindestens über eine optische Umlenkeinrichtung (3.1) verfügt.
24. Verwendung der Vorrichtungen nach einem der Ansprüche 15 bis 23 für invasive medizinische Zwecke.

25

30

Fig. 1

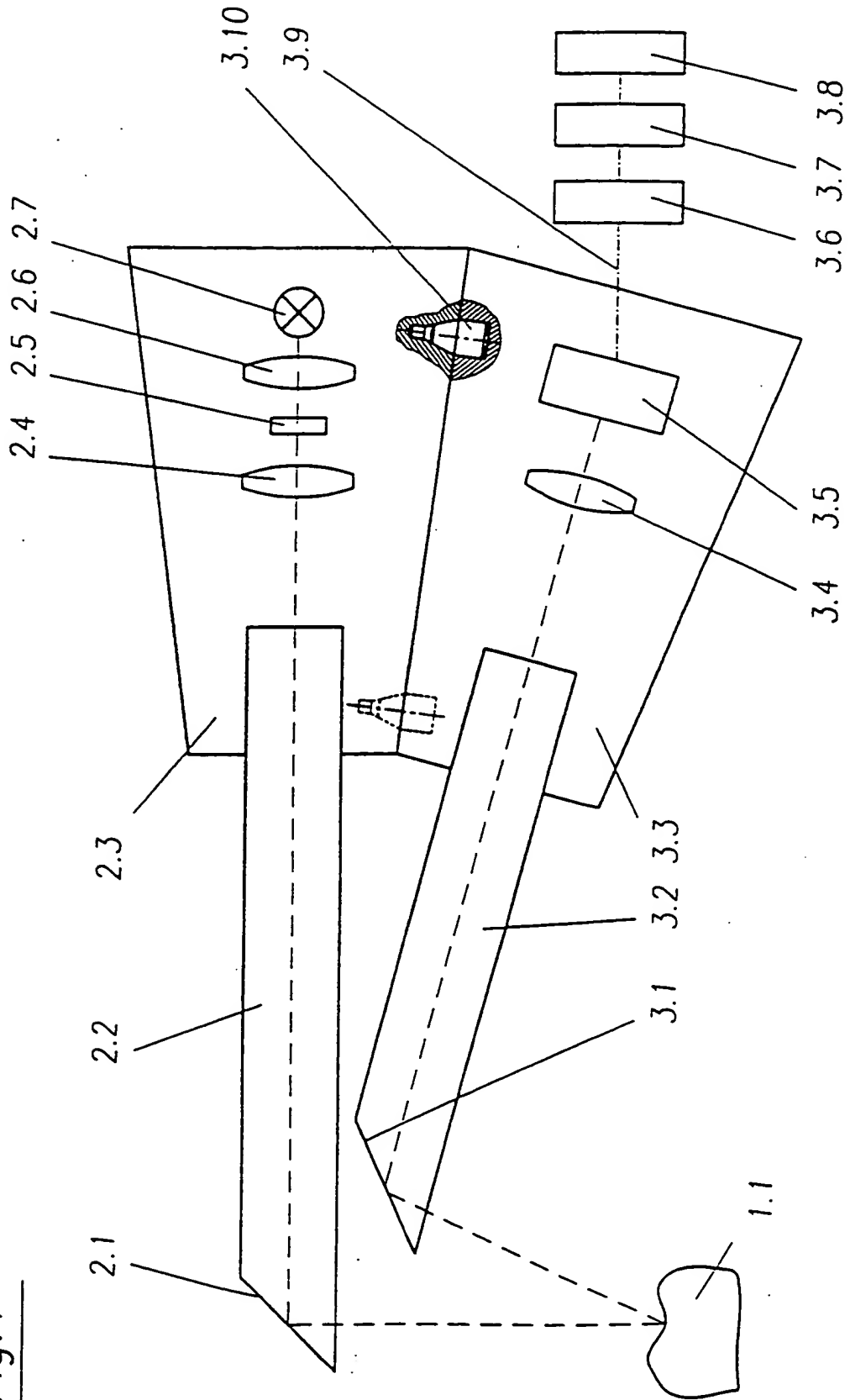


Fig. 2

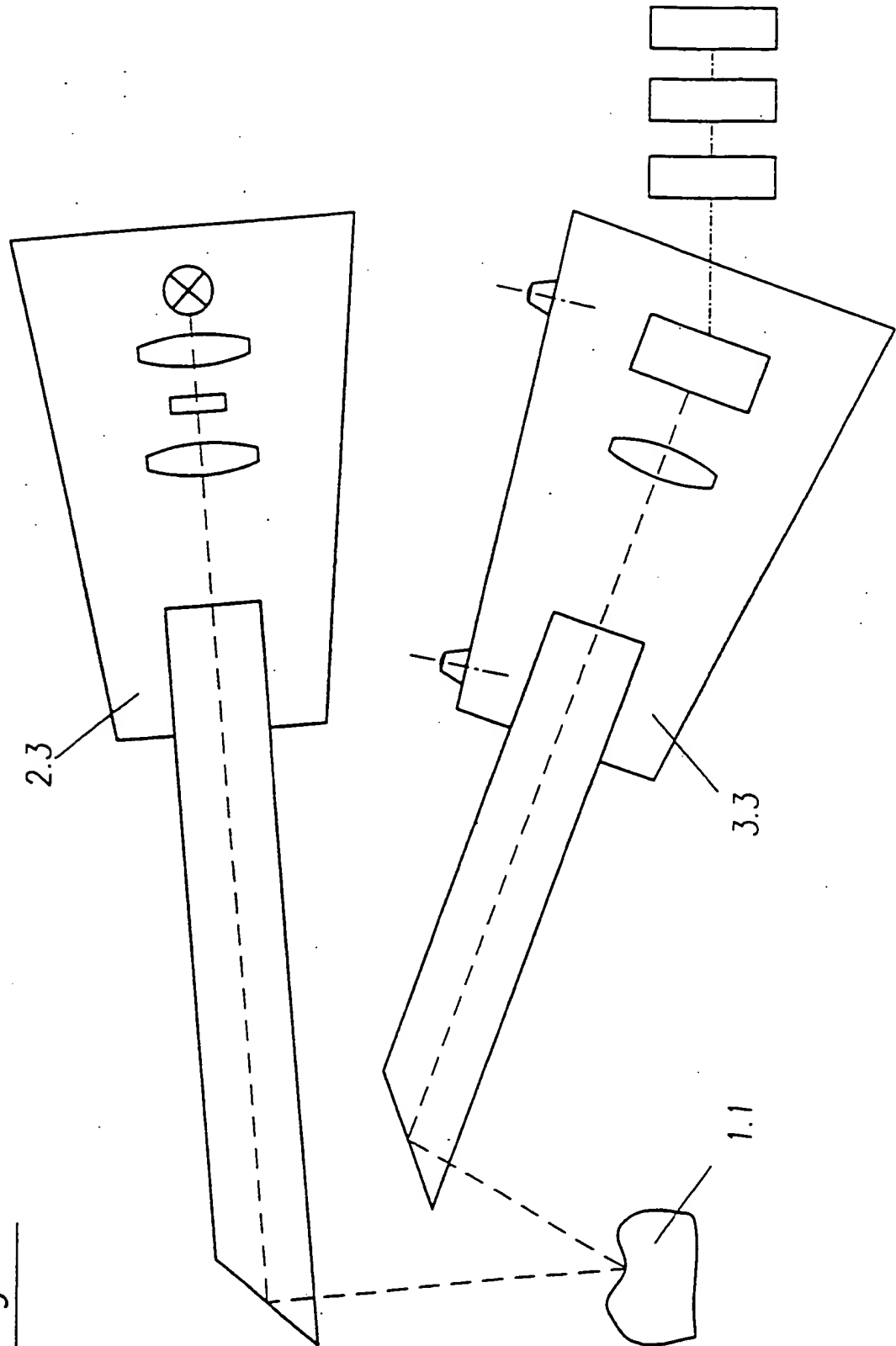
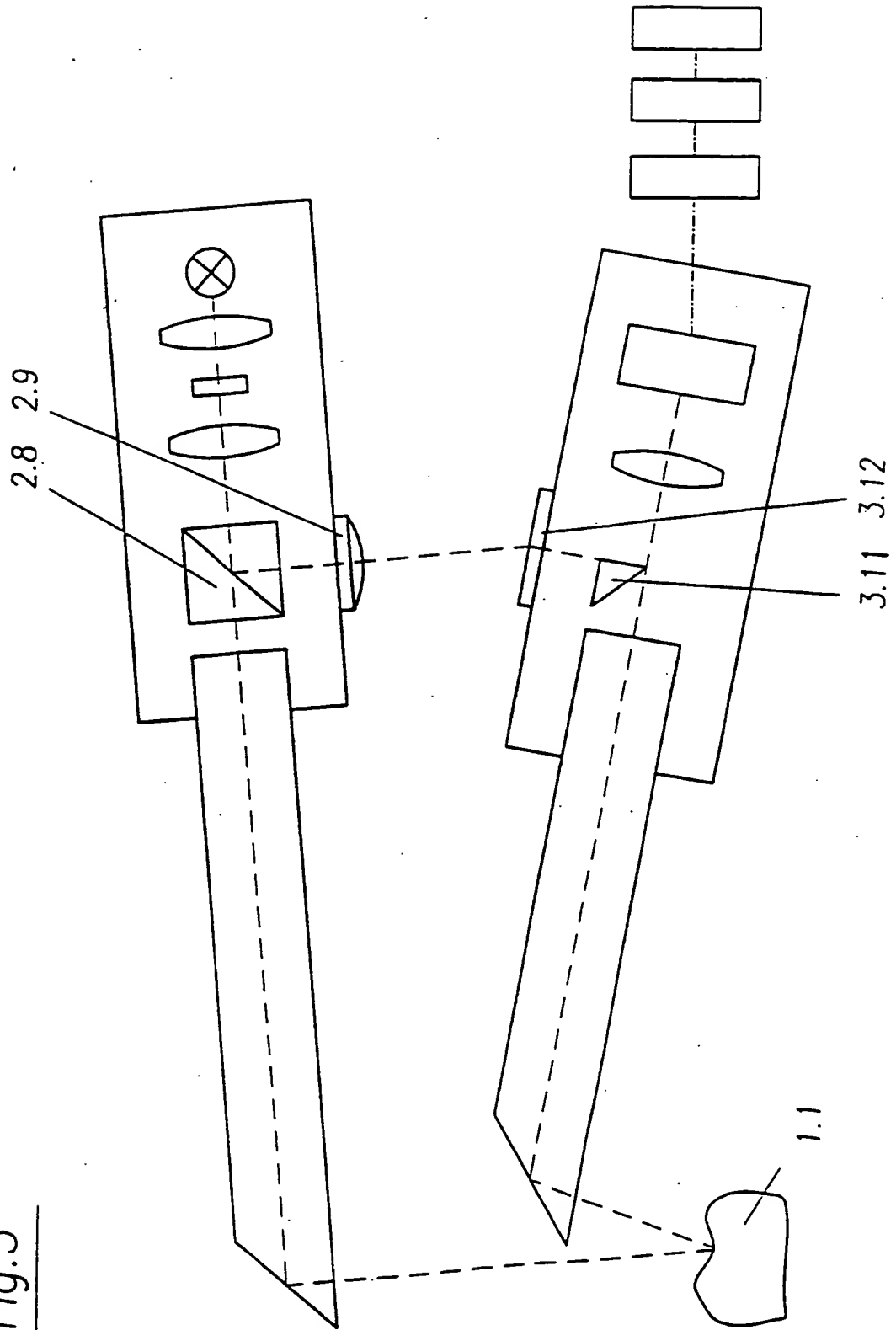




Fig.3



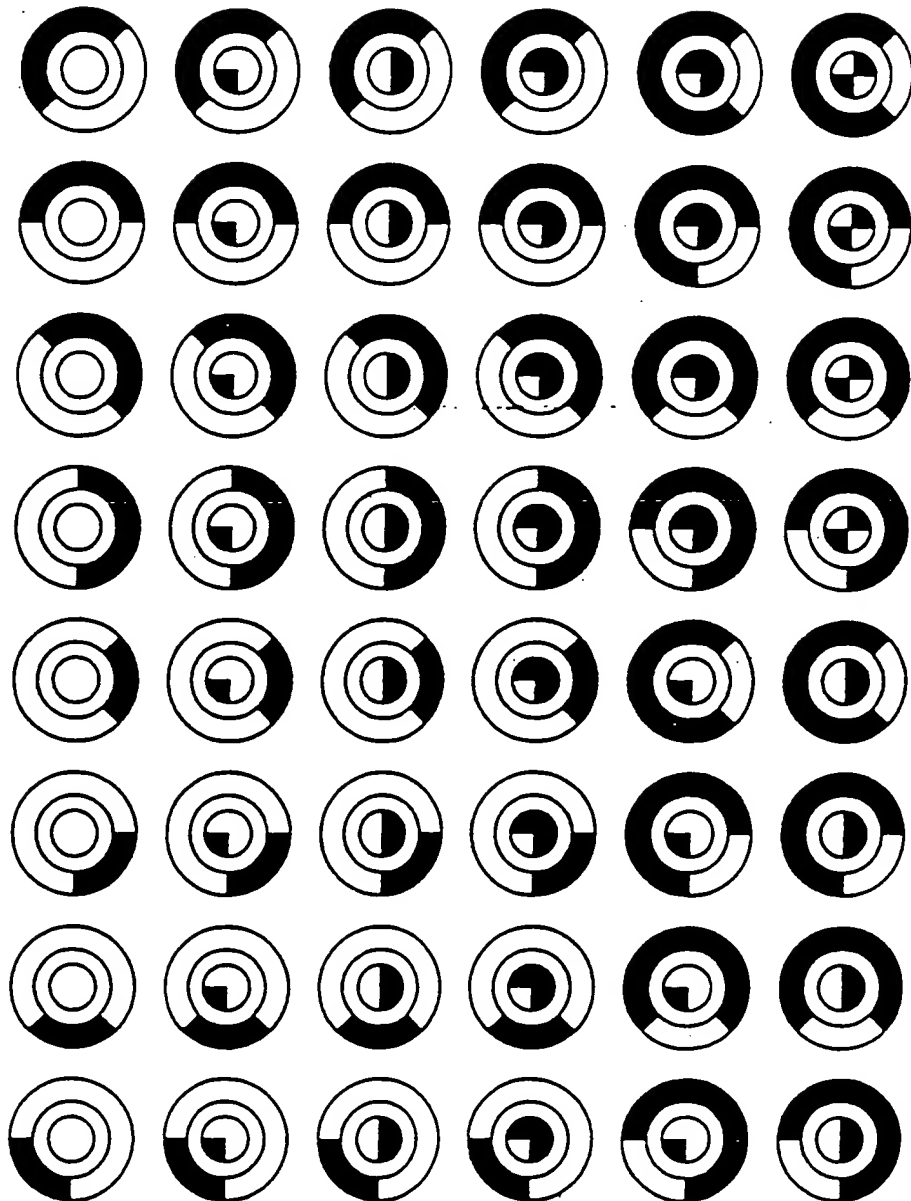


Fig.4

## **A process and device for the three-dimensional measurement of objects**

The invention concerns a process for the three-dimensional measurement of objects through optical exposures, projected patterns, and calculations of triangulation, in which the devices for the projection of the pattern and for the image capture are constructed separately from one another and can, for the measurement, be positioned independently of one another.

Furthermore, the invention concerns a device for such a process.

The use of processes that work on an optical basis offer a multiplicity of advantages for the purpose of measuring. A measurement can be carried out quickly and without contact. Electronic image converters, such as CCD arrays, for example, the output signals of which can be stored or evaluated after digitalization, already belong to the state of the art.

Processes and devices for the representation and three-dimensional optical measurement of spatial surfaces are already known. These are based upon triangulation processes in which patterns of points, lines, or any other chosen patterns are projected, at a certain angle, onto the surface under consideration, and the projected patterns are captured, under another viewing angle, by means of an optical device and an image converter. The known geometry between the direction of projection and the direction of capture permits the three-dimensional calculation of support points of the surface.

If a uniform pattern of lines is projected onto an object with spatial extensions, for example, then, because of the surface shape of the object, a distorted line pattern is brought about in a direction of view which is different from the direction of projection. If the object is represented from this direction of consideration on a CCD-array by means of a suitable optical device, and the image signals are digitalized and made available to a data processing unit, then it is possible to identify the lines at the various points of the image and, given a knowledge of the optical path of the rays,

and under consideration to the geometrical configuration of the projected pattern of lines, to compute the 3D coordinates by means of triangulation.

In the capture of several individual images with different directions of capture, it is already state of the art to combine the partial information obtained about three-dimensional surfaces by means of the 3D coordinates of corresponding surface segments into a total information by means of so-called "matching-algorithms".

It is now desirable to do the following for endoscopic investigations, for example:

- a) To use a separate unit for the projection of the pattern and for the capture of the image, and to use this with an orientation that is freely selectable in relation to the surface to be measured. In order to obtain relevant data for the calculation of the triangulation, a minimum angle between the orientation of both of the units should not be fallen short of in this connection;
- b) Insofar as a series of individual images is captured during the capture process, to change the position and orientation of both of the units independently of one another in relation to the object, such as for the simplification of the handling, for example, in order to be able to measure additional surface areas by means of additional image captures.

It is thus the task of the invention to create the process and the device for the three-dimensional measurement of objects of the type just described, in which the position and orientation of the image capture unit and of the projection unit can be adjusted to one another and, in the event that more than one capture is useful for this purpose, to follow the independent movement of the two units towards one another that has taken place during the course of the capture process. The geometrical connection between the image capture and the pattern projection determined for the specific individual image must then be taken into consideration for the calculation of triangulation.

This task is solved, in accordance with the invention, through the fact that:

- a) Through the use of an electronic surface image converter, a capture process is carried out;
- b) Through the use of a source of beams and suitable optical devices, a pattern is projected onto the object at an angle which is different from the direction of capture that is to be measured;
- c) Through the use of a suitable unit, the output signals of the image converter are digitalized, and these data are made available to a data processing apparatus;
- d) Through the use of a data processing apparatus, 3D coordinates of the points of the surface of the object to be measured are determined, by means of suitable circuits and/or algorithms, through calculations of triangulation from the image data of the individual images;

-- while additional devices are provided in such a manner, and/or the process coming for use and/or the devices are configured in such a manner, that the position and the orientation of the image capture unit and of the projection unit to one another can be determined. If the position and the orientation of both units to one another is known, then, for the capture of an individual image, 3D coordinates can be determined by means of a triangulation calculation, in the known manner and method, for a number of points of the surface.

It is, in accordance with the invention, advantageous to use additional devices for this purpose in order to measure the position and the orientation of the image capture unit and of the projection unit to one another.

In accordance with the invention, this can be carried out, in an advantageous manner, both directly as well as indirectly, both by means of scanning or in connection with measuring means, as well as without contact, such as by optical means, for example.

If information on the object which is additional to that information acquired from an individual exposure is now to be determined, then the image capture unit must be able to record a sequence of individual images. For the task in accordance with the invention, namely, that the projection unit and the image capture unit are moved differently during the course of the image capture process, the devices and/or processes in accordance with the invention must, in an advantageous manner, be configured in such a manner that the geometrical configuration of the image capture unit and of projection unit can be adjusted to one another for the sequential images.

This can, in accordance with the invention, be advantageously guaranteed through the fact that the above-stated measuring devices are also evaluated at the point in time of the exposures that are additionally carried out, and the measuring results are taken into consideration, in the way and manner described above, in the calculation of triangulation.

For the event that, in the sequence of the individual images, the object is recorded in such a manner that the 3D coordinates determined from the individual images describe surface segments that are in agreement to a considerable degree, then -- as has been described above -- the specific 3D information can be combined by means of "matching algorithms" corresponding to the state of the art.

If the capture of the individual images takes place in rapid sequence, then, with a corresponding handling of the units, it can be assumed that -- first of all -- the portion of corresponding surface segments is sufficient and -- secondly -- that the geometrical correspondence of the image capture unit and of the projection unit to one another has only been altered in extent in relation to the previous capture.

If, therefore, the coordination of both units in the first capture was known, for example, and if a considerable number of 3D coordinates describing the surface could be computed, then the information contained in the next capture differs in the following components:

- a) The 3D coordinates of the corresponding surface segments can be represented displaced linearly in the three spatial directions;
- b) The 3D coordinates of the corresponding surface segments can be represented displaced in a rotational manner in relation to the three spatial directions;
- c) The relative position of the image capture unit and of the projection unit to one another can be changed linearly in the three spatial directions;
- d) The relative position of the image capture unit and of the projection unit to one another can be changed in a rotational manner in relation to the three spatial directions.

For the purpose of the generalization of expressions, these possibilities of change will also be termed in the following as "degrees of freedom".

Matching algorithms -- which form, from the different data records of 3D coordinates, the intersections of that data which are to be assigned to corresponding surface segments, and which vary and optimize the possible changes (a) and (b) listed above in such a manner that the intersection of the specific 3D data of both data records fit optimally with one another in regard to the corresponding displacements and rotations -- already belong to the state of the art in the technical area of graphic data processing. One presupposition for this is that the changes (c) and (d) listed above are known.

Algorithms which systematically vary a finite number of degrees of freedom and optimize these in accordance with one or more criteria of quality are already known from numerical mathematics. In a systematic variation, however, the computational expense is raised to a higher power with every additional level of freedom.

Recursively gradated processes which, through a stochastic variation of the degree of freedom and a step-wise selection of each specifically best variant, under the assumption that the quantities of information that are to be evaluated are essentially

similar, reach an optimal solution surprisingly quickly, are already known, in connection with the phrase "evolution strategies", from the field of bionics.

In this sense, it is, in accordance with the invention, advantageous for the solution of the task in accordance with the invention to use expanded matching algorithms in such a manner that:

- First of all - In a recursive numerical process, multiple so-called "successor" variants are first formed through the stochastic variation of the above-stated degrees of freedom (c) and (d);
- Secondly - For every successor variant, the 3D data records are, in the known manner, computed from image information by means of triangulation, in accordance with the assumptions made for the degrees of freedom (c) and (d);
- Thirdly - For every successor variant, the intersections of those data which are to be assigned to the corresponding surface segments are formed, in the known way and manner, in a matching computation from the different data records of 3D coordinates, and the above-listed degrees of freedom (a) and (b) are varied and optimized in such a manner that the intersections formed from the specific 3D data of both data records can, under consideration of the specifically-selected geometrical change, be optimally transformed into one another in relation to the level of freedom (a) and (b);
- Fourthly - Out of all of the successor variants, that one which has the maximum value achieved in regard to the agreement of the data from both data records describing the same surface segment is selected in the sense of an evolution;
- Fifthly - Corresponding to the evolution strategy described, and proceeding from the assumptions that were made for the degrees of freedom (c) and (d) of the previously-selected best successor variants with reduced boundaries of the degrees of freedom (c) and (d), new successors of the next generation are



again stochastically varied in different variants and, in a manner corresponding to the above-stated five points -- first to fifth -- it is then proceeded in a recursive manner for long enough until the boundaries of variation of the degrees of freedom (c) and (d), and the differences between the generations in regard to the maximum value achieved in every passage, are sufficiently small.

As the result, all information required is known with sufficient precision.

It is, in accordance with the invention, advantageous to construct the devices for the projection of the pattern and for the capture of the image in such a manner that these are connected rigidly and in an unambiguous position and orientation with one another during the capture of the first individual image. During the further course of the capture, the connection is detached and a movement independent of one another is thereby made possible. The additional three-dimensional measurement values of the object can then be computed, for every new image capture, with the expanded matching algorithm described above and, as described above, combined into a total information.

In an alternative manner, it is, in accordance with the invention, advantageous to measure the geometrical relation of the projection unit and of the image capture unit to one another through the fact that the pattern used is projected both onto the object as well as onto the image capture unit, and the pattern resulting on a defined surface rigidly connected with the image capture unit is recorded by one area of the image converter. In this sense, the image converter can record the object with one part of its areal field of view, and record the pattern projected onto the image capture unit with the other part.

In the evaluation of the image information, the geometrical position of the two units to one another is, in accordance with the invention, first of all advantageously computed from the distortion of the sample projected onto the surface of the image capture unit, which is, for example, flat and constructed as ground glass disk, by means of triangulation, and the object is, in addition, spatially measured, in relation

to the assignment of both of the units to one another, in the way and manner as described above.

A process in which, in order to prevent multiplicities in the calculations of triangulation, coded patterns are projected onto the object, is already known from the German patent application "A process for increasing the significance of the three-dimensional measurement of objects" of the date September 12, 1996 by the same applicant.

It is, in accordance with the invention, particularly advantageous to use coded patterns for the determination of the coordination of the projection unit and of the image capture unit to one another in such a manner.

A process and a device in which beam paths can be effectively or ineffectively switched in an alternating manner by means of optical means placed synchronously with the alternating image current of the image converter are already known from the German patent application number 196 36 354.3 by the same applicant.

It is, in accordance with the invention, particularly advantageous to synchronously switch the direction of view of the image capture unit, such as by means of two surface-active LCD-units -- which are positioned on two optical axes of a beam splitting devices, for example -- with the image alternating frequency of the image converter in such a manner that they are alternately optically permeable and non-permeable. This has the advantage that, for the purpose of determining the geometrical coordination of the projection unit with the image capture unit, the field of view of the image converter, and thereby the resolution in the representation of the object, does not have to be reduced.

It is, in accordance with the invention, advantageous to additionally provide further optical devices for the projection of a pattern which is different, for example, onto the image capture unit on the projection unit.

In an alternative manner to the surface rigidly connected with the image capture unit that has been described above, the pattern can, in accordance with the invention, be advantageously projected onto a separately-positioned surface with a known spatial extension, in order to determine the coordination of the image capture unit and of the projection unit with one another, and can be represented on the image converter of the image capture unit.

A second image capture unit for the purpose of determining the coordination of the image capture unit and of the projection unit with one another can advantageously be provided in accordance with the invention.

All of the configurations of the process and of the device that are described in this invention can, in a particularly advantageous manner, be combined with one another in multiple ways and manners in accordance with the invention.

The device for the three-dimensional measurement of objects of the type described above solves the task in accordance with the invention through the characteristics that:

- a) At least one electronic surface image converter which uses an optical device suitable for the capture of images is used;
- b) At least one device which carries out the digitalization of the output signals of the at least one image converter and makes these data available to a data processing apparatus is used;
- c) At least one device which permits the projection of a pattern is used;
- d) The devices for the projection of the pattern and for the capture of the image are constructed independently of one another;
- e) At least one data processing apparatus which uses suitable circuits and/or algorithms is suited for the calculation of 3D coordinates in accordance with the triangulation process; and:

- f) At least one device is suited for the determination of the geometrical coordination between the projection unit and the image capture unit.

In one configuration of the device in accordance with the invention which is particularly advantageous, the image capture unit is suitable for the capture of at least two successively following images.

One configuration of the device in accordance with the invention which is particularly advantageous provides devices which can store the data of at least two individual images.

One configuration of the device in accordance with the invention which is particularly advantageous provides devices which process the data of at least two individual images, and are able to combine these by means of suitable circuits and/or algorithms.

Further advantages, characteristics, and possibilities of application of the present invention result from the following description of preferred examples of implementation in connection with the attached diagrams, Figures 1, 2, 3 and 4. These depict the following:

- Figure 1: In schematic form, one form of implementation of the image capture device with the projection [unit] and image capture unit separate from one another, which are here connected together, with the help of positioning rods, for the purpose of the capture of a first image under defined geometrical conditions in relation to the direction of projection and capture.
- Figure 2: The same device as in Figure 1, but decoupled in order to carry out further captures.
- Figure 3: In schematic form, one further form of implementation of the image capture device with the projection [unit] and image capture unit separated from one another, characterized by the additional projection

of the same pattern by way of a second beam path of the projection unit directly onto a ground glass disk of the image capture unit, with this being for the purpose of the continuous calculation of their geometrical situation to one another.

Figure 4: By way of example, one form of implementation of a coded pattern.

In the forms of implementation in accordance with Figures 1, 2 and 3, the projection unit and the image capture unit are, for the purpose of simplifying the description, only depicted schematically without known, obvious device parts. For the simplification of the description, it was additionally dispensed with describing forms of implementation of device parts that belong to the state of the art, such as specific forms of implementation of connections or of part-fixing devices, in full detail.

In the form of implementation of Figure 1, the source of beams (2.7), the optical devices (2.4 and 2.6), and the pattern support (2.5) are rigidly connected with the support mount (2.3) of the projection unit. The optical devices in the form of implementation depicted here involve a source of beams (2.7) by means of which the object can be illuminated on its surface, a condenser (2.6), as well as a pattern support on which the pattern (whether etched in or in the form of a slide transparency) is positioned. The support (2.2) is, for hygienic reasons (for the purpose of disinfection), connected with the support mount (2.3) in a detachable manner. The connection of the support (2.2) with the support mount (2.3) is configured in such a manner that, after a change of the support (2.2), its set geometrical positions are reproduced precisely (without adjustment). The pattern placed on the pattern support (2.5) is projected onto the object that is to be captured (1.1) by means of a beam deflection device (2.1). In order to obtain relevant information for the 3D calculation, a projected line pattern is applied transversely to the level spread on the triangulation angle.

The following are rigidly connected with the support mount (3.3) of the image capture unit: the optical device (3.4), the electronic image converter (3.5), as well as the positioning rods (3.10). The support (3.2) is, for hygienic reasons (for the purpose of disinfection), connected with the support mount (3.3) in a detachable manner. The

connection of the support (3.2) with the support mount (3.3) is configured in such a manner that, after a change of the supports (3.2), its set geometrical position is reproduced precisely (without adjustment). The electronic image converter (3.5) is configured as a CCD array and connected, by way of the electrical connections (3.9), with the control unit (3.6), the A/D converter (3.7), and the data processing unit (3.8). The beams reflected from the object (1.1) are imaged on the image converter (3.5) by means of the optical devices (3.4), in this case an objective lens.

For the carrying out of the first capture, the projection unit and the image capture unit are, with the help of two positioning rods (3.10), brought into a defined position in relation to one another. The triangulation angle which is consequently known permits the calculation of 3D coordinates of the captured image.

Figure 2 depicts the same projection unit and image capture unit, but in the decoupled condition after the carrying out of the first capture in a series of captures of the same object, however. Further images of additional areas of the object and/or from a changed direction of view can now be captured. Because of the high frequency of capture, such as of 50 Hz in the configuration depicted, for example, a high level of overlapping of the images, which is in every case sufficient, can be assumed, which makes it possible, by means of suitable matching algorithms and numerical processes, to compute the positions of the projection unit and the image capture unit relative to one another as well to the object, which positions have changed in relation to the specifically preceding capture, and to thereby also compute the triangulation angle which is specifically relevant, for example. This makes possible the determination of the 3D coordinates of an object, which could not be determined with a single capture.

Figure 3 depicts one form of implementation in which, by means of the projection of the same pattern by way of a second beam path -- that is, in addition to the (invasive) parts of the device that are used -- which is guided from the projection unit to the image capture unit, the relative positions of the projection unit and of the image capture image to one another are known at the point in time of every capture. In this form of implementation, the pattern is diverted by 90 degrees by means of a beam splitting device (2.8) and projected, through a lens (2.9) with a divergent beam path positioned on the projection unit, onto a ground glass disk (3.12) positioned on the

image capture unit. The image of the portion of a pattern which thereby results is, by means of a beam deflection device (3.11), diverted by 90 degrees into the beam path of the support of the image capture unit in such a manner that it is imaged on one half of the two-dimensional field of view of the electronic image converter (3.5). Through the evaluation of the significant pattern segments of the image in the data processing unit (3.8) by means of suitable numerical processes, the position of the projection unit relative to the image capture unit is known for every individual capture. With this form of implementation, the 3D coordinates of which can only be computed through the evaluation of a multiplicity of captures, the attainable precision of the 3D coordinates can be significantly increased in relation to the one described above, particularly in the case of complex objects.

Figure 4 depicts, by way of example, one form of implementation of the pattern, through which, because of the different pattern of each of the individual concentric elements (coding), differences in the calculation of triangulation can be avoided.

One particularly advantageous use of the invention is to be seen in the area of invasive medicine. For the three-dimensional optical imaging of an organ inside the human body, for example, the forward part of the support (2.3) as well as of the support (3.2), for example, are inserted through the abdominal wall, the capture process is started by means of an activation element which is not depicted in the diagrams but which is present in the framework of the data processing unit (3.8), and, during the course of the capturing process, the projection unit and the image capture unit are moved in such a manner that all relevant surface areas of the object (1.1) are gradually represented, both on the image converter (3.5) as well as by the projection of the pattern of lines. The capture process is ended by an additional activation of the activation element stated in the preceding.

As the result of the individual image information captured, the images of the pattern of lines distorted by the surface form of the object (1.1) are now presented. Given a knowledge of the optical beam paths, and with consideration to the geometrical configuration of the projected pattern of lines for the corresponding individual exposures, a multiplicity of support points of 3D coordinates can be computed from the distortion of the pattern of lines. As the result of the 3D coordinates assigned to

the individual images, furthermore, the 3D coordinates can be combined in the way and manner described above so that, as the result, the 3D coordinates of the entire surface investigated are present despite the limitation of the projection surface and of the field of view of the image capture unit. Gaps in information for reason of undercuts are thereby no longer present. The user can additionally optimize the guiding of the capture device by means of an online calculation and indication of the specific interim findings.

The forms of implementation which have been depicted here are distinguished, among other points, by the fact that:

- a) No movable parts are used in the projection unit and image capture unit;
- b) The optical structure is configured in a simple manner;
- d) Apart from the support units (2.2 and 3.2), the support mounts (2.3 and 3.3), and the pattern support for the projection of the pattern (2.5), hardware components of the commercially available type can be used.

A process and a device in which optical devices synchronized with the image alternation frequency of the image converter, in such a manner that a pattern is alternately projected onto the surface to be measured and the surface considered is completely illuminated, is already known from the German patent application number 196 35 354.3 of the same applicant.

In one particularly advantageous configuration of the image capture device in accordance with the invention, additional devices in the previous sense are positioned and placed in such a manner that both 3D information as well as colored views of the surface scanned, for example, can be obtained from a series of individual images.

- - -



## **Listing of reference numbers**

1.1 Object with three-dimensional extension

### **2. Projection unit**

2.1 Beam deflection device (mirror)

2.2 Support (constructed here as a body of optical glass)

2.3 Support mount

2.4 Optical device (objective lens)

2.5 Pattern support (with pattern etched in or a slide transparency, for example)

2.6 Optical device (condensor)

2.7 Source of beams

2.8 Beam splitting device

2.9 Optical device (lens)

### **3. Image capture unit**

3.1 Beam deflecting device (mirror)

3.2 Support (constructed here as a body of optical glass)

3.3 Support mount

3.4 Optical device (objective lens)

3.5 Electronic image converter (CCD Array)

3.6 Starting unit

3.7 A/D converter (/term in English/: "Frame Grabber")

3.8 Data processing unit

3.9 Electrical connections

3.10 Positioning rods

3.11 Beam deflecting device (deflecting prism)

3.12 Ground glass disk

- - -

**Patent claims:**

1. A process for the three-dimensional measurement of objects (1.1) by means of optical exposures, a projected pattern, and calculations of triangulation, with the use of at least one electronic image converter (3.5) with an areal field of view, at least one optical device (3.4) for the representation of the object on the image converter (3.5), and at least one source of beams (2.7) and suitable optical devices (2.4, 2.5, and 2.6) for the projection of patterns, characterized in that:
  - a) The devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern are spatially separated from the devices (3.1 to 3.5) for the image capture, are not connected with them, and can moved in relation to them with all levels of freedom;
  - b) For at least one image capture during the course of the capture process, the geometrical configuration of devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture is not known in advance, and must be determined through the use of additional devices.
2. A process in accordance with claim 1, characterized in that, the additional devices that are used for the determination of the geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture are devices for the measurement of this geometrical configuration.
3. A process in accordance with claim 2, characterized in that, the measurement of the geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern takes place by optical means opposite the devices (3.1 to 3.5) for the image capture.

4. A process in accordance with claim 3, characterized in that, calculations of triangulation with the use of a clearly defined pattern are used for the optical measurement of the geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture.
5. A process in accordance with claim 4, characterized in that, the clearly defined patterns for the optical measurement of the geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture are formed through projection.
6. A process in accordance with claim 5, characterized in that, a beam splitting device (2.8) is positioned in the path of the beam of the projection of the pattern for the measurement of the object (1.1), so that the pattern applied to the pattern support (2.5) is likewise used for the measurement of the object and is represented on a surface (3.12) which is rigidly connected with the support mount (3.3) and is known in its spatial extension.
7. A process in accordance with claim 6, characterized in that, the pattern projected on the surface (3.12) is imaged on the image converter (3.5) by means of the optical device (3.11).
8. A process in accordance with claim 7, characterized in that, the surface (3.12) is a ground glass disk.
9. A process in accordance with claim 7, characterized in that, the optical devices (3.11) are a mirror.
10. A process in accordance with claim 7, characterized in that:
  - a) The optical devices (3.11) comprise a beam splitting device which covers the entire beam path;

- b) At least two individual captures are carried out during the course of capture process; and:
- c) Additional switchable optical devices are positioned on two optical axes of the beam splitting devices, which are synchronously switched at the image alternation frequency of the image converter in such a manner as to be alternately optically permeable and non-permeable.

11. A process in accordance with claim 1, characterized in that:

- a) At least two individual captures are carried out during the course of the capture process;
- b) The geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture for the exposure of an individual image is known;
- c) For significant areas of the object, for which, even during this image capture -- which was carried out with a known geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture --, a sufficient number of 3D coordinates of surface areas could be formed, corresponding image information is also present in the following individual images;
- [d]) The geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture is computed from a comparison of the data originating from the individual images in relation to the information concerning the surface areas of the object likewise represented with the use of numerical algorithms.

12. A process in accordance with claim 11, characterized in that, the geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture for the exposure of

an individual image is known through the fact that the positioning rods (3.10) are marked.

13. A process in accordance with claim 11, **characterized in that**, the numerical algorithms that are used, which compute the geometrical configuration of the devices (2.1 to 2.7) for the projection of the pattern in relation to the devices (3.1 to 3.5) for the image capture, involve processes in accordance with an optimizing development strategy.
14. The use of the process in accordance with one of the claims 1 to 13 for medical diagnosis, therapy, or documentation.
15. A device in accordance with one of the claims 1 to 13, **characterized in that**, at least one image converter (3.5) is configured as a CCD array.
16. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15, **characterized in that**, the support mount (2.3) or the support (2.2) rigidly connects at least two of the devices (2.4 to 2.7).
17. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15 and 16, **characterized in that**, the support mount (3.3) or the support (3.2) rigidly connects the devices (3.4 and 3.5).
18. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15 to 17, **characterized in that**, the support (2.2), with its structural parts, is connected with the support mount (2.3) in a detachable manner and is, incidentally, configured in such a manner that it is suited for a separate sterilization or disinfection.
19. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15 to 18, **characterized in that**, the support (3.2), with its structural parts, is connected with the support mount (3.3) in a detachable manner and is, incidentally, configured in such a manner that it is suitable for a separate sterilization or disinfection.

20. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15 to 19, **characterized in that**, at least one system of lenses for the optical representation of the object (1.1) on the image converter (3.5) is attached to the support (3.2).
21. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15 to 20, **characterized in that**, at least one system of lenses for the optical projection of the pattern onto the object (1.1) is attached to the support (2.2).
22. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15 to 21, **characterized in that**, the support (2.2) has at least one optical deflecting device (2.1).
23. A device in accordance with one of the claims 1 to 13 as well as 15 to 22, **characterized in that**, the support (3.2) has at least one optical deflecting device (3.1).
24. The use of devices in accordance with one of the claims 15 to 23 for invasive medical purposes.

- - -